



В
И
И
И
А

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ "РОСАТОМ"

ФГУП "ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ им. Н.Л.Духова"

Ускорение ионов интенсивным «медленным» светом

Е.А. Говрас, А.В. Брантов, В.Ю. Быченков

*ЦФПИ, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН*

Снежинск, 2017

Коллективное ускорение ионов

Отцы-основатели

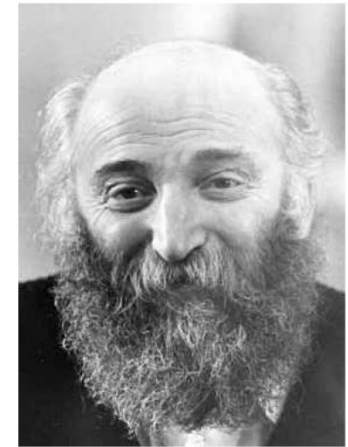
**CERN Symposium on
High-Energy
Accelerators and Pion
Physics, CERN, Geneva,
Switzerland,
June 11-23, 1956**



**В.И. Векслер
1907-1966**



**Я.Б. Файнберг
1918-2005**



**Г.И. Будкер
1918-1977**

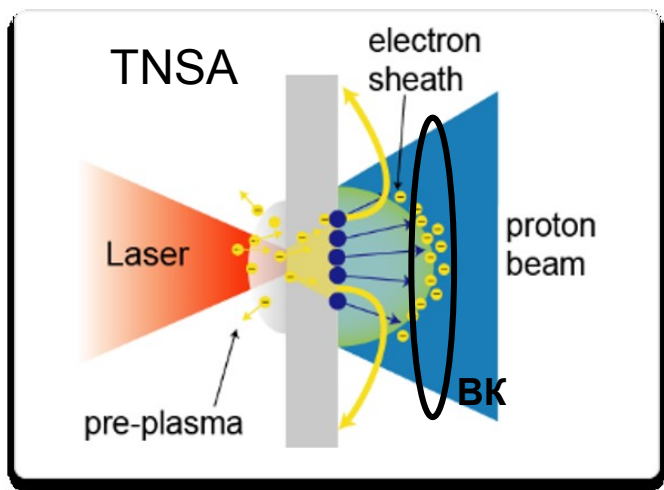
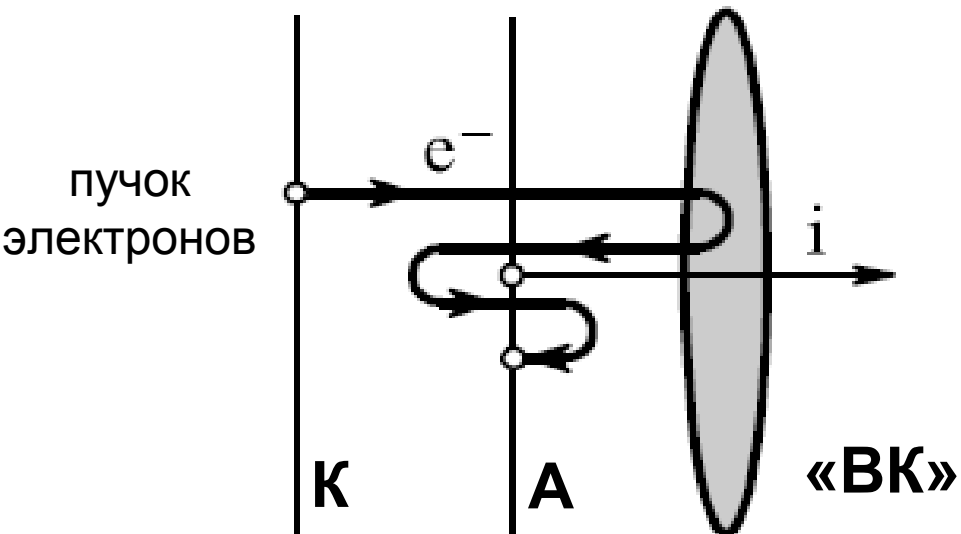
THE PRINCIPLE OF COHERENT ACCELERATION
OF CHARGED PARTICLES

V.I. Veksler

V. I. Veksler
Sov. J. Atom. Energy **2**, 525 (1957)

Пучок электронов: ускоряющие поля появляются вследствие коллективного воздействия большого числа электронов, которые ускоряют малую долю ионов до больших энергий, превосходящих энергию электронов

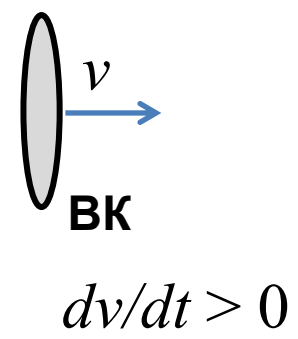
Ускорение «виртуальным катодом»



КАК синхронизировать движение фронта ВК с ускоряемыми ионами?

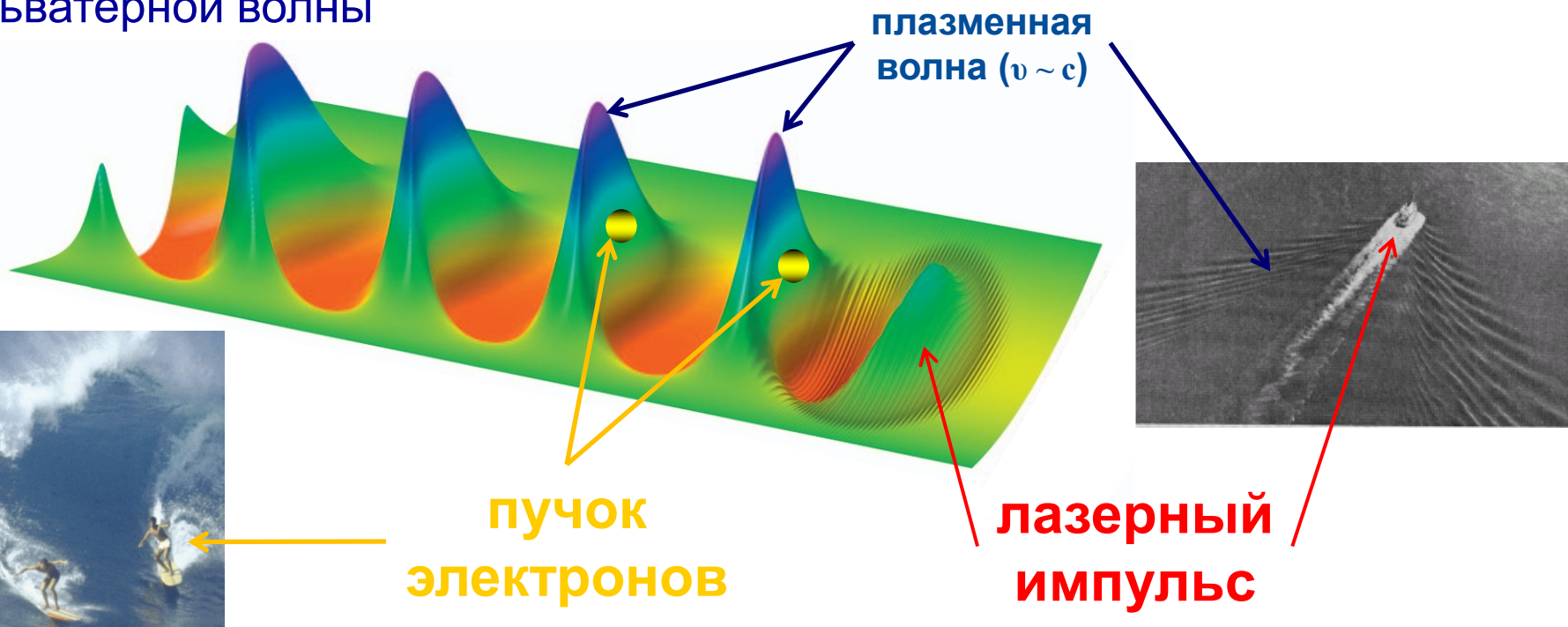
Yu. V. Tkach et al., Zh. Tekh. Fiz. 44 658 (1974);
 C. N. Boyer et al., IEEE Transactions Nucl. Sci. NS-24, 1625 (1977)

formation of a virtual cathode behind the anode plane and the trapping of positive ions in the potential well of this virtual cathode. If one could control the velocity of the collective field propagation in synchronization with the positive ion velocity, the large collective fields of such a system (about 1 MV/cm, typically) would make possible the construction of an economically competitive ion accelerator.



LWFA ускорение электронов

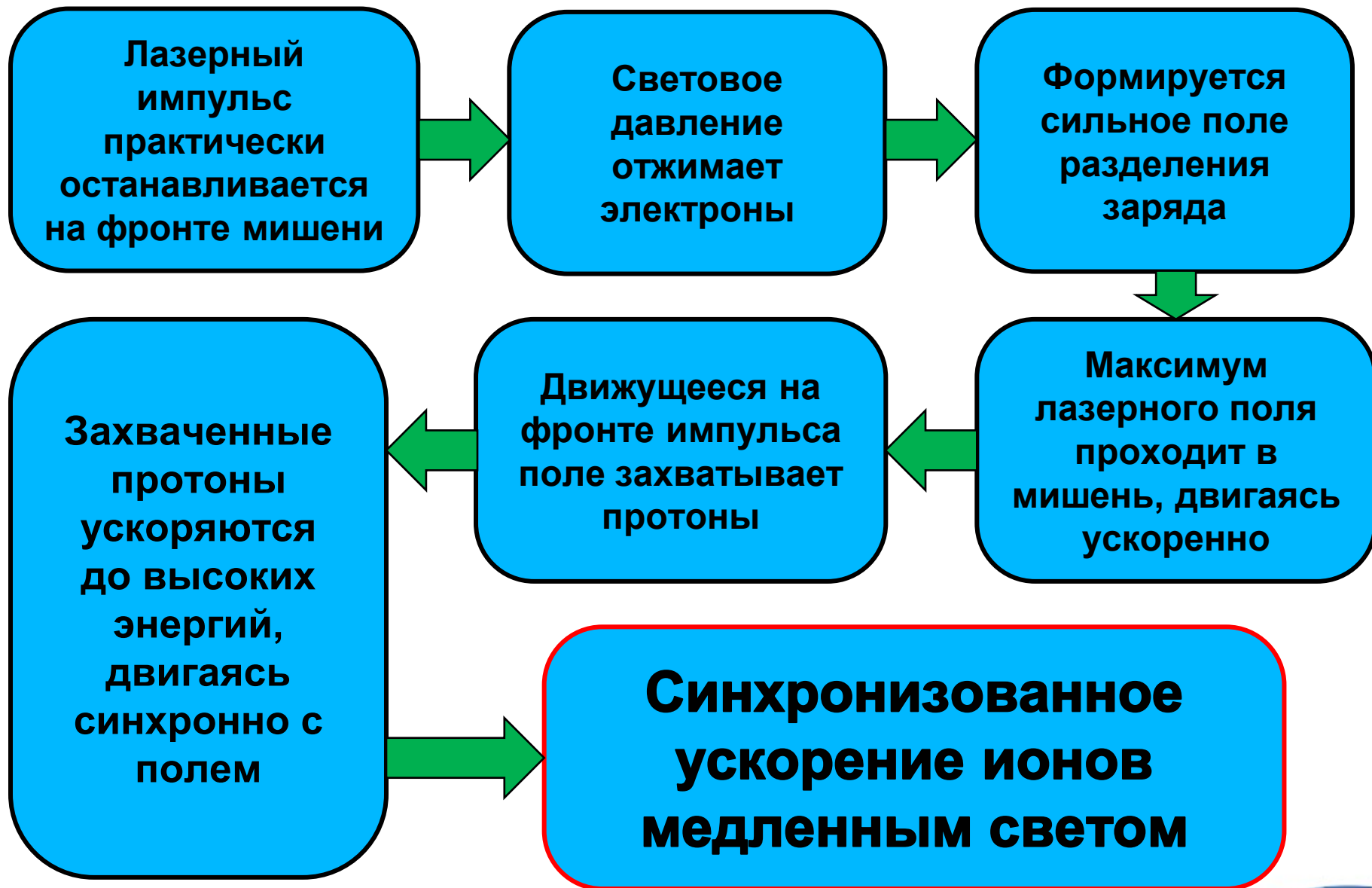
LWFA (Laser WakeField Acceleration) – ускорение полем лазерной кильватерной волны



В прозрачной плазме кильватерная волна движается почти со скоростью света, что позволяет ускорять электроны до больших энергий.

Инжекция ионов напрямую в быструю ускоряющую структуру затруднена вследствие их бóльшей массы → свет нужно «замедлить»!

Принципиальная схема



«Затвор»: релятивистская прозрачность

Закон дисперсии поперечных колебаний в плазме: $\omega^2 = \omega_{pe}^2 + k^2 c^2$

Аналогично формуле плазменной частоты $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n / m_e}$

Вводится понятие критической плотности: $\omega = \sqrt{4\pi e^2 n_{cr} / m_e}$

Для плазмы: $n > n_{cr}, \omega_{pe} > \omega$ излучение не проходит в плазму (скинируется)
 $n < n_{cr}, \omega_{pe} < \omega$ излучение проходит в плазму

Воздействие релятивистского лазерного импульса меняет плазменную частоту:

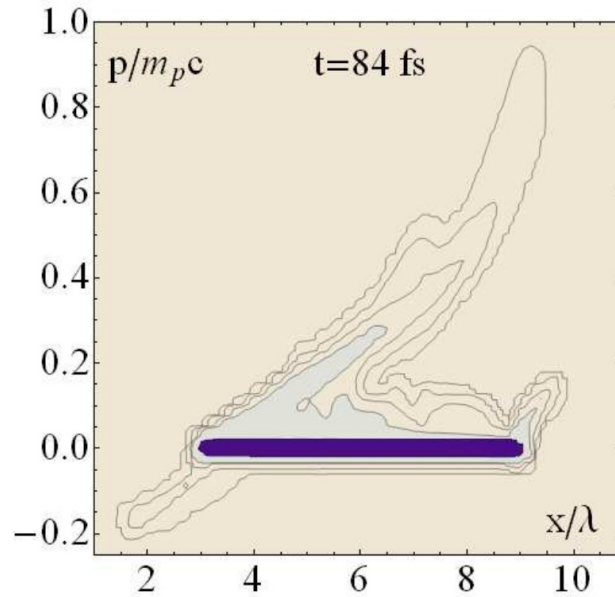
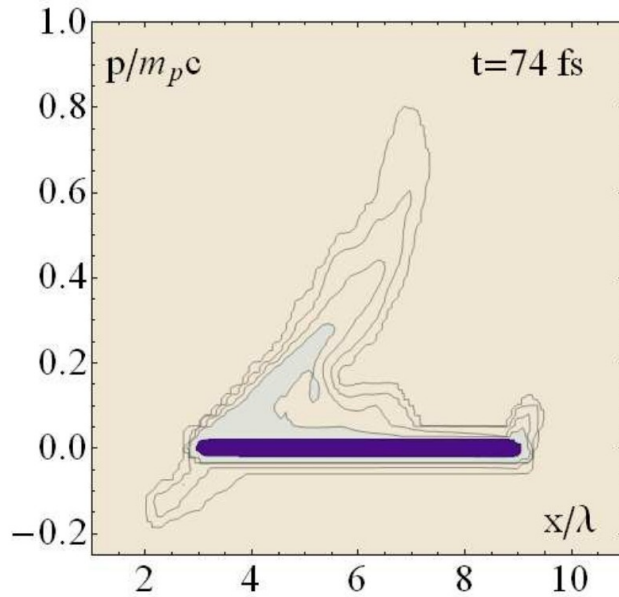
$$m_e \rightarrow m_e^* = \gamma_e m_e \quad \omega_{pe} \rightarrow \omega_{pe}^* = \frac{\omega_{pe}}{\sqrt{\gamma_e}} \quad \gamma_e = \left[\sqrt{1 + a^2} - 1 \right]$$
$$a = 0.85 \sqrt{\lambda [\text{мкм}]^2 I [\text{Вт/см}^2]} 10^{-18}$$

В плазме с $\omega_{pe}^* < \omega < \omega_{pe}$ реализуется релятивистски индуцированная прозрачность
 $n_{cr} < n < \gamma_e n_{cr}$

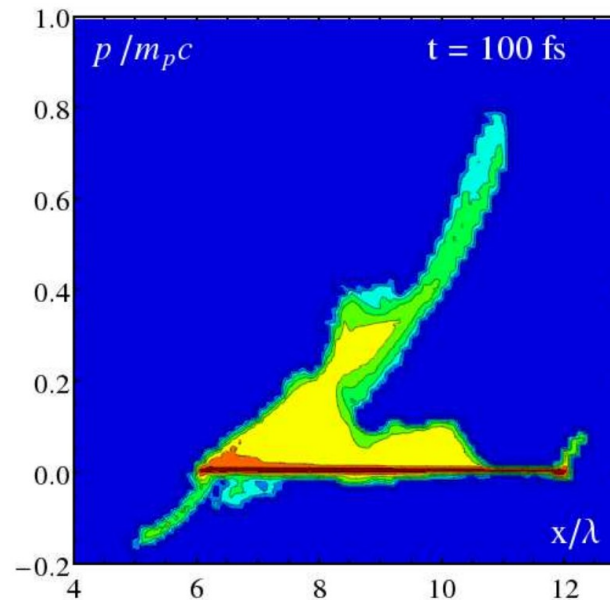
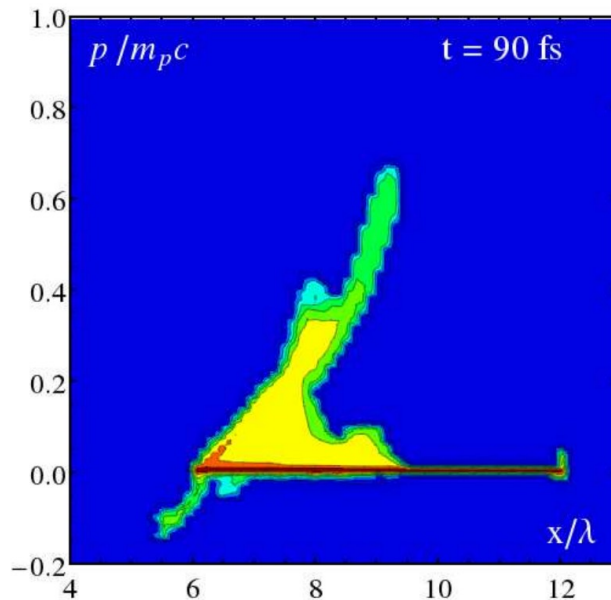
Групповая скорость в индуцированно-прозрачной плазме: $v_g = c \sqrt{1 - \frac{n}{\gamma_e n_{cr}}}$

Эффект индуцированной прозрачности может играть роль «затвора», регулирующего прохождение лазерного импульса в плазму: тормозит части импульса с малой амплитудой ($v_g \equiv 0$) и пропускает части с большой амплитудой.

3D3V PIC-моделирование



Mandor



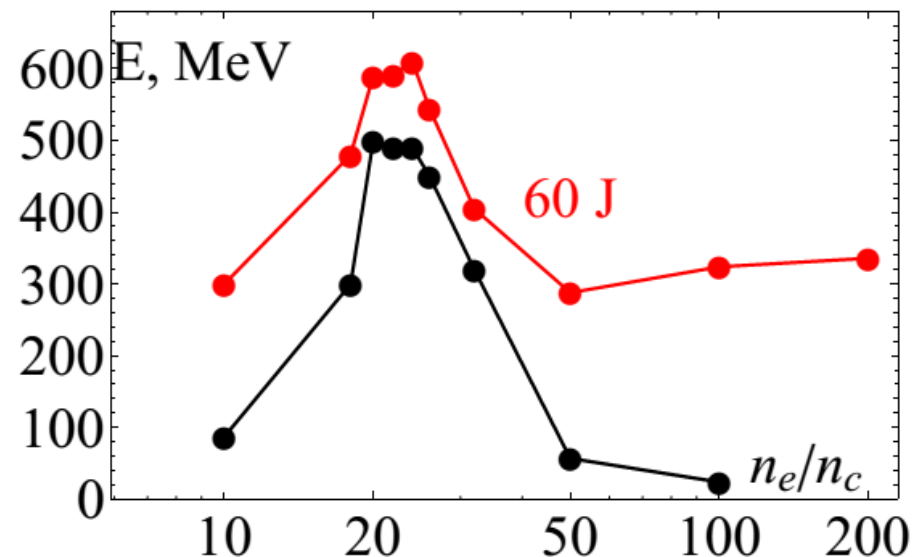
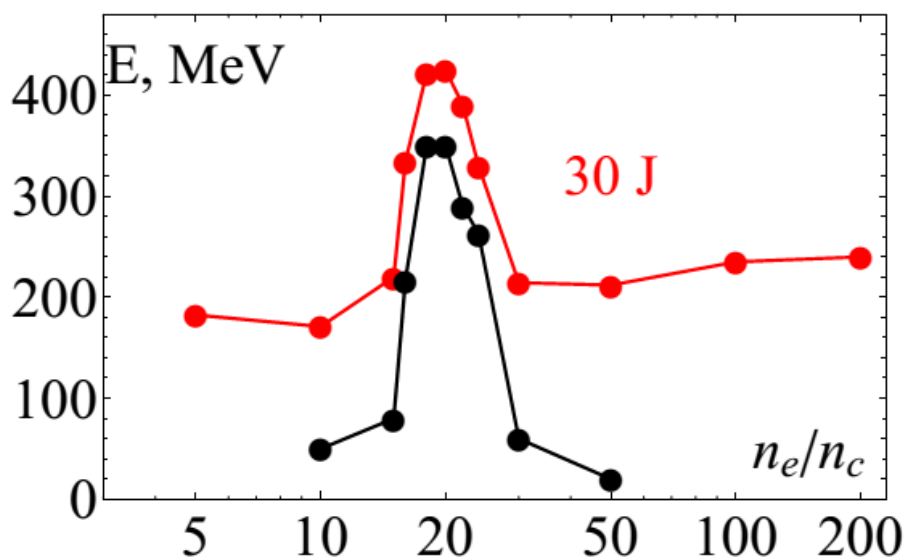
**VSim
(Vorpal)**

Сравнение с оптимальными фольгами

Использование **малоплотных мишеней** с плотностями порядка релятивистского значения критической плотности плазмы может увеличить энергию ионов и снизить требование на качество импульса:

Лазер: 30 Дж, $\tau = 30$ фс, $D_f = 4$ мкм, $I = 5 \times 10^{21}$ Вт/см²

Мишень: CH₂

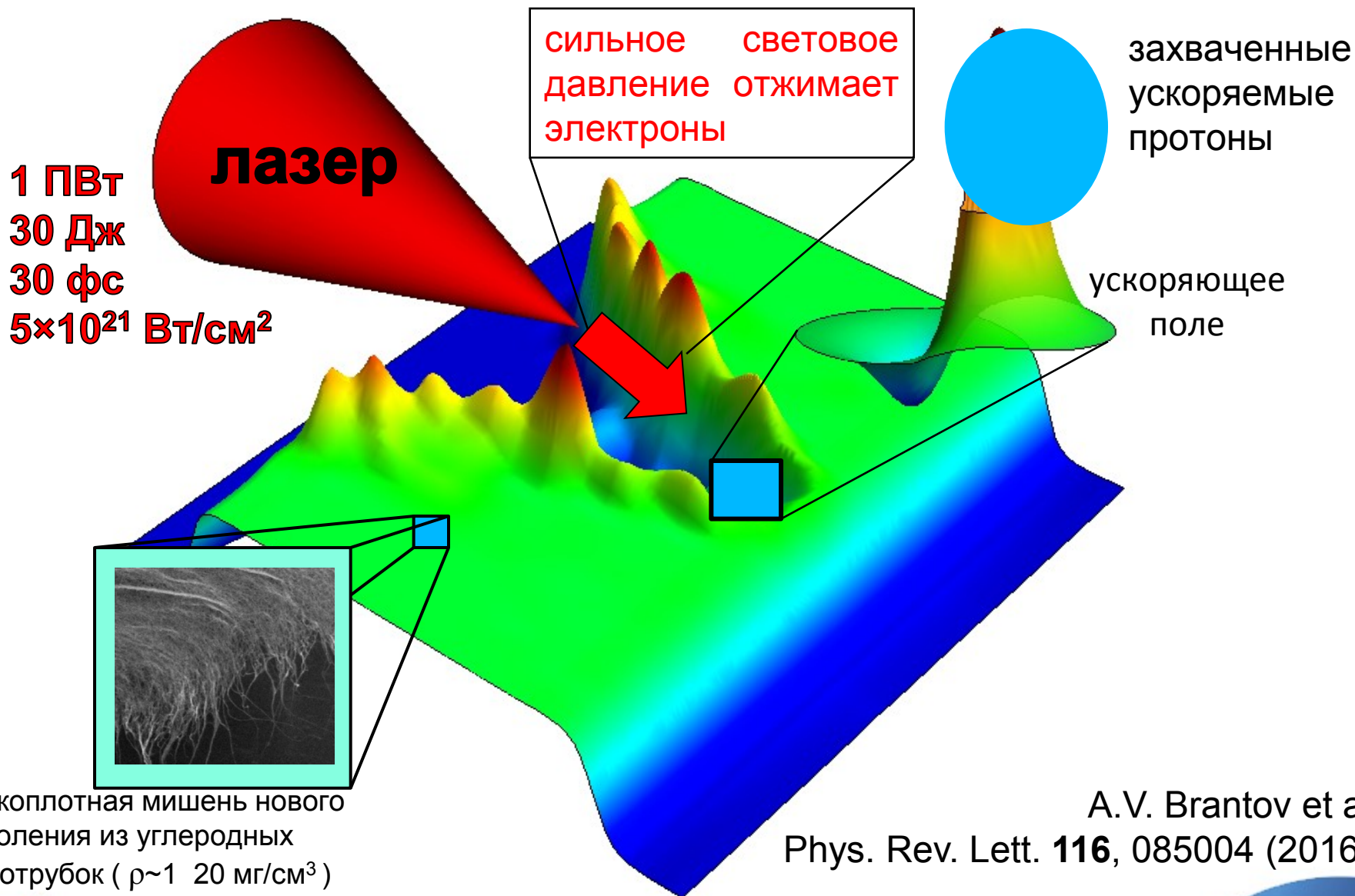


Энергия, набранная **внутри** мишени (чёрный), и **полная** энергия (красный) для мишеней оптимальной толщины. Вне резонансной плотности энергии порядка десятков МэВ!

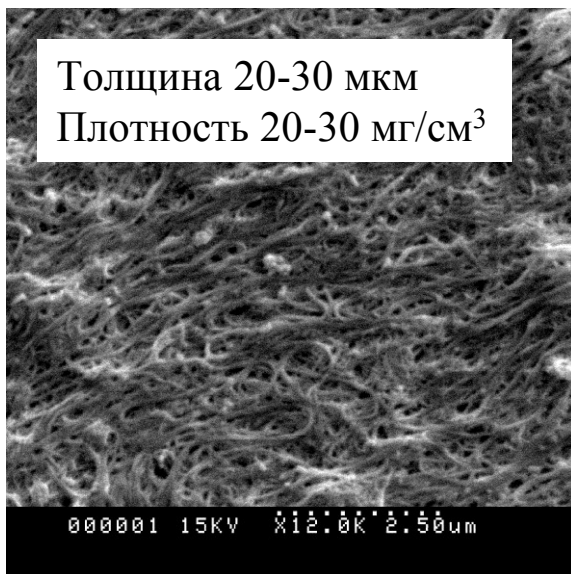
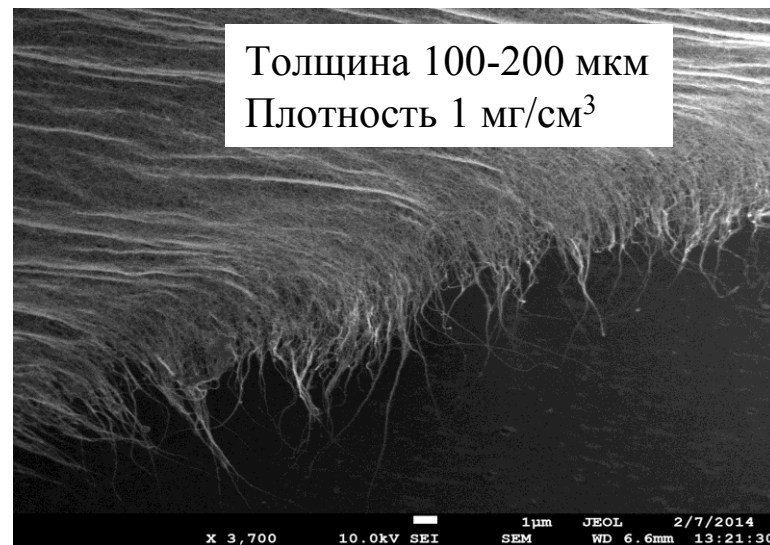
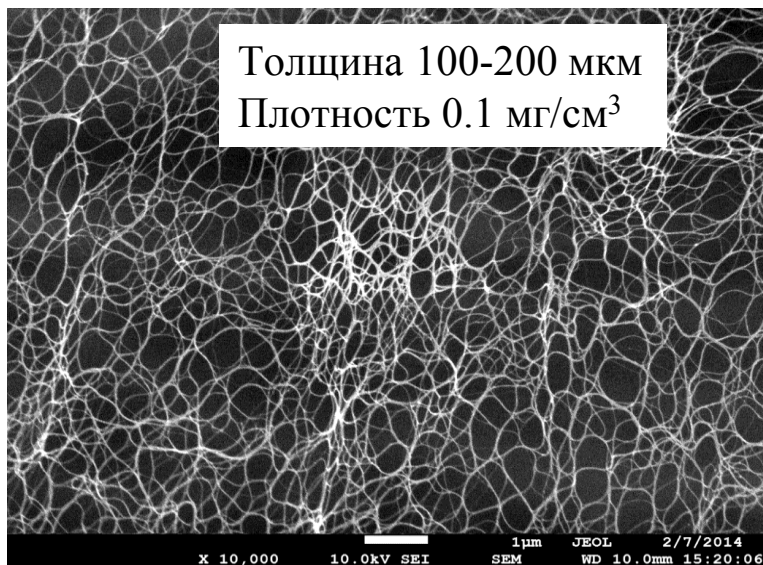
Поведение максимальной энергии от плотности носит резонансный характер

Всегда лучше оптимальной твердотельной мишени!

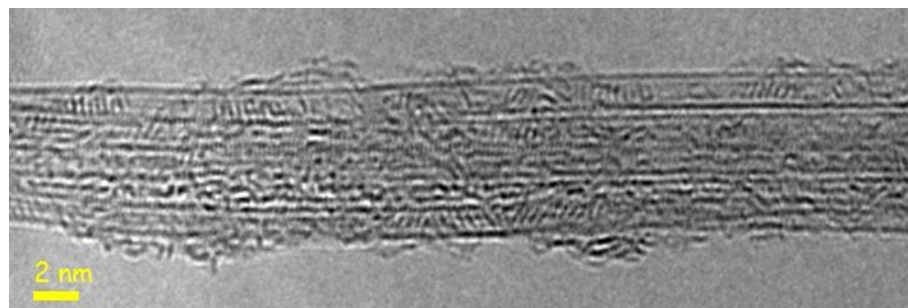
Принципиальная схема



Малоплотные мишени



До 2 % по массе можно заполнить водородом ($C_{24}H_{12}$)

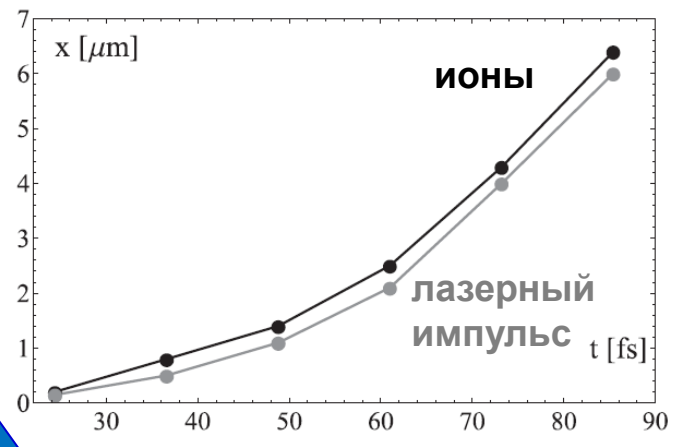
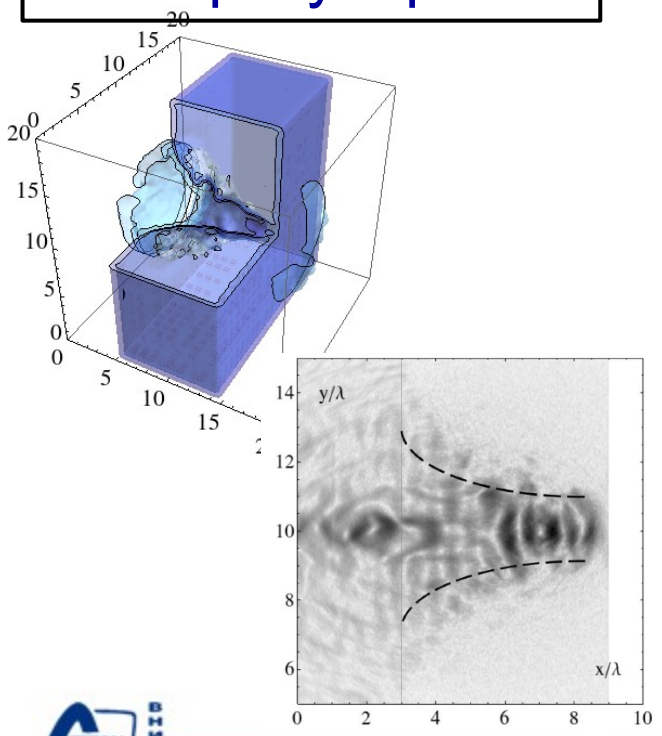


малоплотные мишени из углеродных нанотрубок: плотность больше газовой и меньше твердотельной

Что дальше?

Как заставить лазерный импульс двигаться долго и ускоренно ?

Релятивистская самофокусировка



Профилирование плотности мишени

$$n_e(x) = \frac{n_c}{(1 + w x)^2}$$
$$v_g = \frac{w_0 t}{\sqrt{1 + (w_0 t)^2}}$$

В.Ю. Быченков и др.
Письма в ЖЭТФ **104**, 640 (2016)



Заключение

- Предложен новый механизм синхронизованного ускорения ионов ультра-интенсивным медленным светом (СУМС) из малоплотных мишеней
- Основное ускорение происходит внутри мишени и даёт энергии большие, чем оптимальные фольги твердотельной плотности
- Малоплотные мишени из углеродных нанотрубок обладают широким диапазоном плотностей, толщин и степеней насыщения водородом и доступны для экспериментальных исследований
- Требуется детальное изучение распространения лазерного импульса в таких мишенях

Спасибо за внимание!